

研究報告 1

ポジトロニウムの超微細構造測定のためのジャイロトロンの開発

Development of Gyrotron for measurement on hyperfine structure of positronium

漆崎 裕一, 小川 勇, 出原 敏孝, 斉藤 忠昭, 末原 大幹¹,
宮崎 彬¹, 山崎 高幸¹, 難波 俊雄¹, 浅井 祥仁¹, 小林 富雄¹

Yuuichi Urushisaki, Isamu Ogawa, Toshitaka Idehara, Taikan Suehara¹,
Akira Miyazaki¹, Takayuki Yamazaki¹, Toshio Namba¹, Shoji Asai¹, Tomio Kobayashi¹

福井大学遠赤外領域開発研究センター
Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui
Fukui 910-8507, Japan

¹ 東京大学素粒子物理国際研究センター
¹*International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo*
Tokyo 113-0033, Japan

Abstract

Gyrotron FU CW V was designed and constructed as a radiation source for direct measurement on hyperfine structure (HFS) of positronium. The designed cavity mode is TE₀₃₁. The observed frequency is from 202.89 to 203.39 GHz and the maximum output power around 0.7 kW. The operation is in complete CW or long pulse mode. This gyrotron is suitable for a preliminary study on the first measurement of the HFS, because the estimated energy level difference of positronium is around 203.4 GHz.

1. はじめに

電子と陽電子からなるポジトロニウム(Ps)では、二つのスピンの向きが同じオルソポジトロニウム(o-Ps)と逆向きのパラポジトロニウム(p-Ps)の二つの状態が存在する。1984年に V. ヒューズらのグループにより 3.66 ppm の精度で o-Ps と p-Ps のエネルギー準位差(ΔHFS)は $h \cdot \Delta\nu = h \cdot 203.4 \text{ GHz}$ 程度の差があることがわかり、これは当時の束縛系 QED による 2 次の高次効果の項までの理論計算精度 50 ppm をはるかに凌駕していた。ところが近年、理論計算が 3 次の高次効果まで発達し、理論精度が 3 ppm と以前の実験精度を追い抜き、理論値と測定値の不一致が確証された。

当時の測定方法は、高出力な光源は低周波領域に限られていたため、磁場を印加してゼーマン効果を用いた間接的な方法が採用されていたが、印加磁場強度の非一様性から生じる誤差の可能性が排除できず、理論値との不一致が起こった事が考えられる。そこで現在、高周波数・高出力の電磁波を発振可能な光源としてジャイロトロンを使用した磁場による影響を排除することのできる直接的な実験を試みている。

この実験は、当センターと東京大学素粒子物理国際研究センターとの共同で進めている。本研究報告では、Ps の HFS 測定のための第一段階として、o-Ps から p-Ps への遷移を確認するために、203.4 GHz 程度の周波数領域において発振出力 100 W(デューティ比 30 %~50 %)を目標とし開発を行ったジャイロトロン(Gyrotron FU CW V)の動作試験結果について述べる。

2. 実験装置

開発を行った Gyrotron FU CW V とその断面図を図 1 に示す。このジャイロトロンは 8 T の He フリー超伝導マグネットを使用しており、超伝導状態にするためコンプレッサによって冷却している。ジャイロトロン管内部は真空ポンプにより $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ Pa}$ まで排気可能である。図 1 に示すように、管下部にはマグネトロン入射型電子銃と電子ビームを制御するため補助磁場発生用の 3 枚の水冷式銅コイルを、内部には共振器マグネットの中心磁場に設置してある。管上部にはサファイア真空窓が設置されており、電子銃から発射された電子の運動エネルギーの一部が共振器内部で電磁波に変換され、この真空窓から出力される。このジャイロトロンにおける共振器の設計値は半径 $R_c=2.39 \text{ mm}$ 、長さ $L_c=14 \text{ mm}$ であり TE_{03} モードにおいて発振周波数が 203.4 GHz が見込めるような構造となっている。

動作試験では、Gyrotron FU CW V の特性を調べるために、発振測定、周波数測定、出力測定を行った。次にその測定方法について述べる。

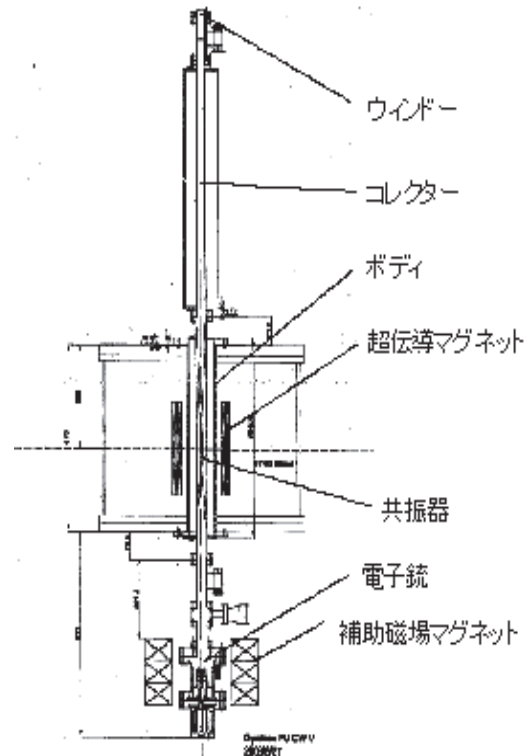


図 1 Gyrotron FU CW V とその断面図

3. 測定方法

3-1 発振出力の磁場強度依存性

シミュレーションから求めた発振開始電流の磁場強度依存性をもとに、実験から発振が期待されるモードが得られるかを測定した。測定方法は、ジャイロトロン出力窓から出力された電磁波を導波管及びマイターベントを用いて伝送したのち焦電型検出器を用いて検出した。

3-2 周波数測定

ジャイロトロンから出力される周波数はサブテラヘルツ帯であるため、スペクトラムアナライザーの測定可能範囲を超えており、直接測定することはできない。そこで、ハーモニックミキサーおよびシンセサイザーからなるヘテロダインシステムを用いた。これにより、高周波であるジャイロトロン周波数とシンセサイザーの低周波をハーモニックミキサーでミキシングすることで中間周波数を作り出し、それをスペクトラムアナライザーで調べ、周波数を求めた。

3-3 出力測定

出力測定には水負荷を用いた。水負荷測定方法は、石英でできたコーン状の容器に水を入れ、ジャイロトロンから発振した電磁波を伝送している導波管に挿入することで水に電磁波を吸収させ、水の温度上昇から求める方法である。出力の算出には次の式(1)を用いた。

$$P = \frac{4.19c\rho V \Delta T}{t \times D.R.} \quad (1)$$

ここで、 C は比熱[cal/g・K]、 ρ は媒質密度[g/cm³]、 V は体積[cm³]、 ΔT は温度上昇値、 t は挿入時間、 $D.R.$ はデューティ比である。水の場合 $C = 1$ cal/g・K、 $\rho = 1$ g/cm³ となる。デューティ比を式に組み込むことで、連続動作時の出力を見積もっている。

4. 実験結果

4-1 発振出力の磁場強度依存性とモードの同定

Gyrottron FU CW V で行った発振測定の結果と磁場強度に対する発振開始電流のシミュレーション結果を図 2 に示す。この時の発振条件は、カソード電圧値 20 kV、アノード電圧値 12.3～14.5 kV、ビーム電流値 280 mA、補助磁場電流値 150 mA として行った。図 2 (a)の結果を見て分かる様に、図 2 (b)のシミュレーションによって予測される磁場強度で発振が起こっていることが分かる。次に、発振測定によって得られた各モードに対して周波数測定を行った。その結果を表 1 に示す。

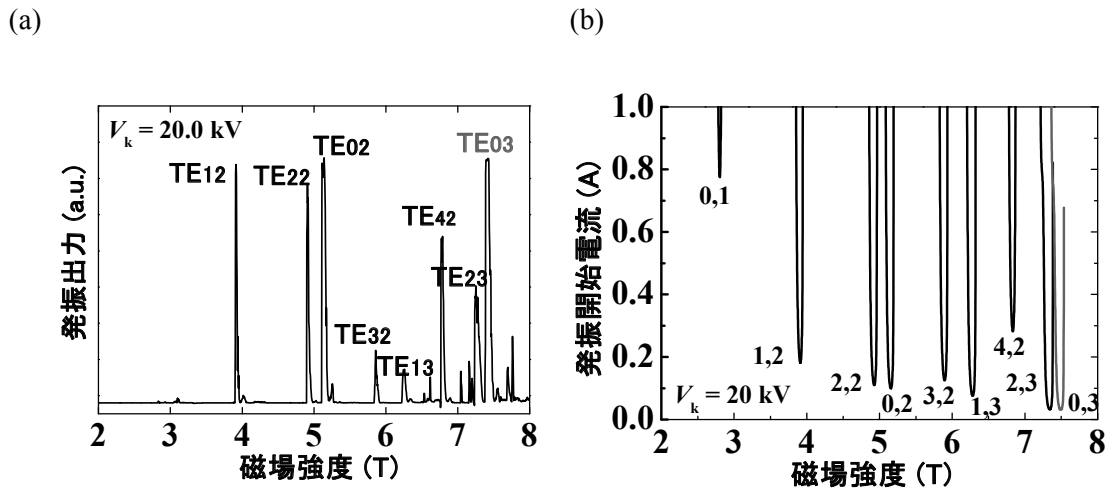


図 2 (a)カソード電圧 $V_k = 20$ kV の時の Gyrottron FU CW V 発振測定結果,

(b)発振開始電流のシミュレーション計算値

表 1 各モードに対する周波数測定結果

B_0 (T)	f_{cal} (GHz)	f_{meas} (GHz)	Mode number	Δf (GHz)	ΔR (μm)
3.887	107.00	106.57	1,2	-0.43	11.4
4.870	134.45	134.00	2,2	-0.45	10.0
5.110	140.62	140.06	0,2	-0.56	11.6
5.840	160.54	159.95	3,2	-0.59	10.1
6.729	185.67	185.21	4,2	-0.46	7.5
7.238	199.43	198.83	2,3	-0.60	8.8
7.364	203.42	202.89	0,3	-0.53	7.9

表 1 において、 B_0 は磁場強度、 f_{cal} は周波数計算値、 f_{meas} は周波数測定値、 Δf は周波数の計算値と測定値の差、 ΔR は予想される共振器の半径誤差を示している。この結果から、各発振におけるモードの同定を行い、目標としている周波数 203.4 GHz 付近の発振として、磁場強度 7.364 T で TE_{03} モード、202.89 GHz の発振を確認することができた。各モードにおける周波数をみると、どのモードにおいて計算値よりも低い結果が得られている。この原因として、共振器の製作誤差が影響を与えていると考えている。周波数計算値は、 χ' をベッセル関数の微分 $J'_m(x)=0$ の n 番目の根、 l を軸方向モード数とすると、次の式(2)で示すことができる。

$$f_{\text{cal}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\chi'_{m,n}}{R_{\text{cav}}}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{L_{\text{cav}}}\right)^2} \quad (2)$$

実験結果と計算結果における周波数異の平均は、約 -0.52 GHz であった。この差を考慮し、式(2)を用いて共振器の半径を求めると、 $9.7 \mu\text{m}$ 大きく作られていることに対応する。次に、周波数が 203.4 GHz 近傍である TE_{03} モードの発振について特性を調べた。

4-2 TE_{03} モードにおける特性

TE_{03} モードの発振は、磁場強度 7.30～7.47 T の範囲で起こっている。この発振領域において出力と周波数を実験により求めた。図 3 にその結果を示す。この時の発振条件は、カソード電圧値 18 kV、アノード電圧値 12 kV、ビーム電流値 400 mA、デューティ比 10 %、繰り返し周波数 5 Hz として行った。この結果より、周波数は TE_{03} モードの範囲内において 202.89～203.39 GHz を得ることができた。その特性は、図を見てわかるように連続的に変化しているのではなく、階段状に周波数がシフトしている傾向があった。目標としていた 203.4 GHz に近い 203.39 GHz という周波数を得ることができたが、

この周波数での発振出力は水負荷装置での出力測定ができないほど微弱であった。発振出力においては、周波数は 202.89 GHz において最大となる約 650 W を得ることができた。このことから、デューティ比を 30 % とした時、200 W 程度の平均出力を期待することができる。

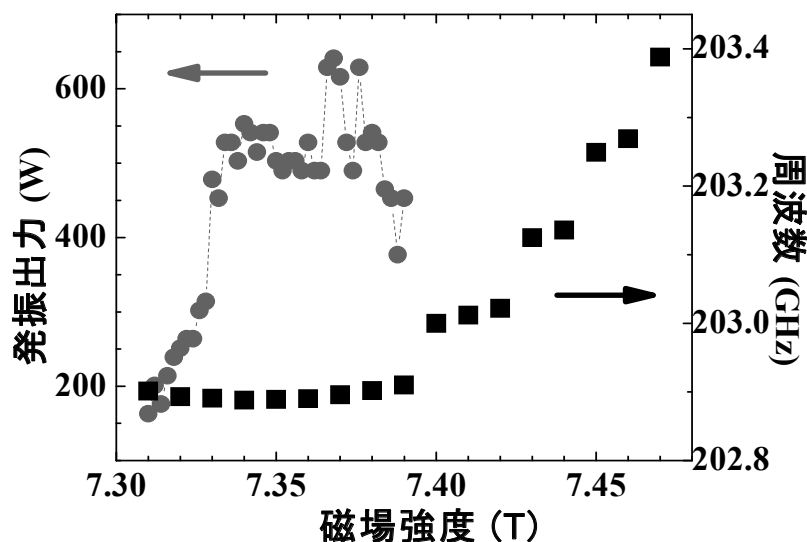


図 3 TE₀₃ モードにおける発振出力と周波数

5. まとめ

ポジトロニウムの超微細構造測定のための第一段階として、オルソ状態からパラ状態への遷移を確認するために Gyrotron FU CW V の動作試験を行った。その結果、TE₀₃ モードの発振領域において周波数領域は 202.89～203.39 GHz であり、最大出力は周波数 202.89 GHz のところで 650 W を得ることができた。オルソ状態からパラ状態への遷移実験での測定条件であるデューティ比を 30 % とすると、平均出力 200 W の出力を期待することができ、これは目標としていた 100 W を達成している。周波数においては、おそらく共振器の製作誤差による影響により、出力がピークとなる磁場領域では、設計周波数である 203.4 GHz から若干低い 202.89 GHz が得られたが、この周波数はオルソ状態からパラ状態への遷移を測定するのに十分な値である。

これらの結果より、Gyrotron FU CW V はポジトロニウムの超微細構造測定のための第一段階として、オルソ状態からパラ状態への遷移実験に使用することが可能であり、現在その実験を行っている。

参考文献

- [1]浅井祥仁著：基礎物理学への応用サブテラヘルツ波を用いた束縛系 QED の精密検証, Plasma Fusion Res.VoL84, No.12, 902-905 (2008).
- [2]末原大幹著：Probing the Energy Structure of Positronium with a 203 GHz Fabry-Perot Cavity, Journal of Physics : Conference Series 199, 012002 (2010).